

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції
«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»

18 грудня 2025 року



Полтава 2025

УДК 629.783

О.С. Фомін, к.т.н., доцент

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ШИРОКОСМУГОВИЙ ВИМІРЮВАЧ ПОТУЖНОСТІ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

На сьогоднішній день безпілотні літальні апарати (БПЛА) набули широкого використання, як в цивільній, так і в оборонній сферах. Маючі у складі телекомунікаційні вузли, вони стають джерелом сигналів, які забезпечують зв'язок між апаратним комплексом і оператором, керування польотом, передачу телеметричних даних і відеопотоку в реальному часі. Спектральні, потужнісні та модуляційні характеристики радіовипромінювання БПЛА лежать в основі їх виявлення, ідентифікації та моніторингу. Саме параметри радіосигналів визначають вимоги до вимірювальних пристроїв, таких як чутливість, діапазон частот, селективність і можливість працювати в умовах радіоперешкод. Контроль потужності наявного радіовипромінювання у просторі є першою і базовою задачею ефективного моніторингу БПЛА, що робить актуальною розробку відповідного устаткування, здатного працювати в складних умовах міського та заміського середовищ.

Для аналізу радіовипромінювання використовуються, як професійні аналізатори спектра і портативні вимірювачі, так і аматорські програмно-апаратні рішення. Кожен з таких комплексів характеризується своїми перевагами та недоліками, які визначають їх здатність ефективно аналізувати сигнали БПЛА. Стандартом для аналізу радіосигналів вважаються професійні вимірювальні комплекси від провідних компаній, таких як Rohde & Schwarz, Keysight Technologies і Anritsu. Завдяки високій точності, широкому частотному діапазону і вбудованим засобам обробки сигналів вони є потенційними лідерами серед приладів для радіомоніторингу повітряного простору.

Аналізатор спектра Rohde & Schwarz FSVR працює в діапазоні від 10 МГц до 7 ГГц. Це дозволяє повністю охопити основні діапазони БПЛА (від 433 МГц до 5.8 ГГц), а завдяки чутливості -160 дБм - виявляти найслабші сигнали на великих відстанях. Похибка вимірювання при цьому не перевищує 0.5 дБ, що є, по суті, найвищим стандартом точності [1]. Проте, висока вартість (~20 тис. дол.) робить його малоприсадибним для масового використання, а маса порядку 10–15 кг і потреба в стаціонарному живленні суттєво обмежують його можливості в польових умовах.

Keysight N9912A FieldFox - це портативний аналізатор масою 3 кг, здатний працювати на частотах від 100 кГц до 6 ГГц. При похибці не більше 1 дБ чутливість приладу досягає -148 дБм [2]. Він здатен виявляти БПЛА за

сигналами на відстані до 1 км. Аналіз спектра відбувається при цьому у реальному часі. Проте, висока вартість (~10 тис. дол.), обмежена тривалість роботи від батареї (не більше 3-4 годин) та необхідність кваліфікованих спеціалістів обмежують його використання в умовах, де потрібні мобільність та автономність.

Професійні комплекси та портативні рішення мають високу точність і широку функціональність, включаючи цифрову обробку в реальному часі, але їх висока вартість, складність у використанні, габарити роблять їх непрактичними в ситуаціях, коли потрібні економічна ефективність і простота експлуатації. Аматорські рішення, побудовані здебільшого на основі SDR, характеризуються відносно невисокою вартістю і простотою реалізації, але мають обмежений діапазон частот, чутливість та стійкість до радіозавад.

Для побудови вимірювача потужності обрано True Rms детектор ADL5902 від Analog Devices через оптимальне поєднання чутливості (-60 дБм), динамічного діапазону (65 дБ) і низької величини похибки (1 дБ). Він здатен працювати з різними типами модуляції, покриває діапазон 50 МГц – 9 ГГц і є економічно вигідним. При цьому детектори на основі діодів мають недостатню чутливість, а теплові датчики - надмірну вартість і розміри.

Сигнал знімається з широкосмугової логіперіодичної антени, підсилюється вхідним підсилювачем та через смуговий фільтр надходить на вхід детектора потужності. Керамічні смугові фільтри передбачено для зменшення електромагнітних перешкод у діапазонах 2.4 ГГц (2400–2483 МГц) і 5.8 ГГц (5725–5850 МГц) [3]. Вихідна напруга детектора оцифровується АЦП. Використано 24-бітний сігма-дельта АЦП, із частотою дискретизації 1,28kHz. Це забезпечує точне перетворення аналогового сигналу з детектора для подальшої обробки. Роздільна здатність у 24 біти (ефективна роздільна здатність ~20 біт) дозволяє виявляти зміни потужності з високою точністю. Керування АЦП, дисплеєм і обробка даних здійснюються мікроконтролером STM32F103 (32 біт, 72 МГц, 128 КБ флеш-пам'яті). Він дозволяє ефективно обробляти дані у реальному часі, забезпечуючі при цьому низьке енергоспоживання (50–100 мА при 3.3 В). Передбачено USB інтерфейс для інтеграції з персональним комп'ютером, що дозволяє зберігати результати вимірювань та проводити їх більш детальний аналіз.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Rappaport T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall, 2024.
2. N9912A FieldFox Handheld RF Analyzer, 4 GHz and 6 GHz. Режим доступу – <https://www.keysight.com/us/en/product/N9912A/fieldfox-a-handheld-rf-analyzer-4-ghz-6-ghz.html>

3. *Coaxial-Ceramic Resonator Filters and Multiplexers. Режим доступу - <https://www.minicircuits.com/pdfs/CBP-5800AG+.pdf>*

WIDEBAND RADIO RADIATION POWER METER

O. Fomin, *Candidate of Engineering Sciences/PhD, Associate Professor
National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”*